

降雨時の浸透挙動と斜面の不安定化について

Seepage Behaviors and Instability of Slopes during Rainfall

成田国朝[†]

Kunitomo NARITA

Abstract : FEM saturated-unsaturated seepage flow analyses were conducted on slopes of soil layers with uniform thickness, to evaluate seepage behaviors during rainfall and their influences on instability of slopes by wetting. Direct causes of slope failures during rainfall are supposed to be the following two; one is the increase of the pore-water pressure due to the rise of the water table by rain, and the other the spatial difference of that to cause seepage failure such as piping. Main influential factors to be considered in the analysis are then listed as the configuration of slopes (height, inclination, thickness of layer), the strength of rainfall (ratio to the coefficient of permeability of soil), mechanical properties of soil (strength and deformation characteristics and strength reduction by wetting), and initial condition of soil layer before rain (initial degree of saturation and the effect of previous rain). Several patterns of calculations were made in this paper to evaluate numerical consequences of these influential factors against instability of slopes during rainfall.

1. はじめに

自然斜面や盛土斜面が豪雨により崩壊し、人的・物的に多大な被害を及ぼす事例は後を絶たない。特に近年は、異常気象に伴う局地的・集中的な豪雨が被災を拡大している。豪雨時に斜面を不安定化させる主たる要因は、斜面内の間隙水の状況であるが、その内訳として、①降雨に伴う飽和度の変化、すなわち斜面を形成する土砂の飽和化による物性変化、例えば不飽和状態の盛土や風化地山層のサクシヨン低下に伴う強度低下や耐震性の低下、②浸透水の滞留に伴う地下水位の上昇、つまり斜面内の間隙水圧の高まりに起因するすべり破壊や、斜面下部の排水による浸透破壊の発生、③降雨前の初期状態と降雨の繰り返し効果、これによる斜面の飽和化と水位上昇の助長、などが具体的な項目として挙げられる。

これら豪雨時の斜面の不安定化現象に関しては、一様層厚の盛土や自然斜面を対象に、降雨を発生して土層内の浸透挙動を観測しながら、再現された破壊のメカニズムや各種要因の影響を解明する試みが、重力場・遠心場の実験として既に幾多行われている。

例えば、秦ら¹⁾は、高さ約 1.2m のまさ土の盛土を振動台上に構築し、人工降雨を与えたのち加振して、降雨による盛土の耐震性低下の現象を調べている。実験と同時に行った動的 FEM 解析との比較では、降雨時の地盤物性の変化を飽和度の上昇に伴う粘着力の低下としてモデル化することで、盛土内の変形量の増加と耐震性の低下が良く説明できるとしている。また、笹原ら²⁾は、厚さ 50cm の砂質土から成る均質斜面の表面や内部に、表面変位計、間隙水圧計、土壌水分計、内部ひずみ計などを一定間隔に設置し、人工降雨を与えて土層の挙動を詳細に観察する大型模型斜面実験を行っている。そして、一つの特徴的な成果として、降雨時の斜面内の圧縮・せん断変形は、降雨による吸水過程（体積含水率の増加やサクシヨンの低下）だけでなく、降雨後の排水過程やサクシヨン等が一定の状態でも生じ、変形のメカニズムは従来考えられているほど単純ではない、ことを提示している。

以上の他、この種の実験は斜面高が数m規模の大型実験装置を用いて重力場で行われることが多いが、遠心場の実験としては、金子ら³⁾の降雨に伴う地下水形成と砂層斜面の表層型崩壊との関係を調べた実験、泉ら⁴⁾の地震により生じたクラックや変形が降雨時の斜面崩壊に与

[†] 愛知工業大学 工学部 都市環境学科（豊田市）

える影響を追求した実験、さらに岩船ら⁵⁾の一樣厚で緩く堆積した砂斜面の崩壊挙動を再現し、FEM 解析結果と対比した研究などが挙げられる。

本研究は、自然斜面や盛土斜面を対象として、降雨時の傾斜地盤内の浸透挙動を FEM 飽和・不飽和浸透解析で明らかにし、土層内の浸透挙動と飽和化に伴う斜面の不安定化の関係、すなわち地下水位の上昇に伴う間隙水圧の増加が表層地盤のすべり破壊に及ぼす影響や、間隙水圧の空間的变化に伴う斜面下部の浸透破壊(パイピング)の可能性など、降雨時の斜面崩壊現象に関する要因分析を試みるものである。

降雨時の表層地盤内の浸透挙動を支配する要因には、地盤の形状(斜面の高さや勾配、表土層の厚さなど)、降雨の強さ(表土層の透水係数との関係)、表土層の力学的特性(強度・変形特性や飽和化に伴う強度低下の特性)、更に初期状態(初期飽和度や繰り返し降雨の影響)など、多様な状況・条件が想定されるので、本文では可能な限りの条件設定の下で解析を行い、降雨時の斜面崩壊・不安定化の要因を見出したいと考えている。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析に使用した有限要素モデルを図-1 に示す。傾斜岩盤上に張り付いた一樣厚の盛土や風化土層を対象に要素分割し、その形状(高さH、勾配n、幅B)の変化が、雨の強さ r/k (k :土層の飽和透水係数)とともに、降雨時の浸透挙動と不安定化に及ぼす影響を調べる。

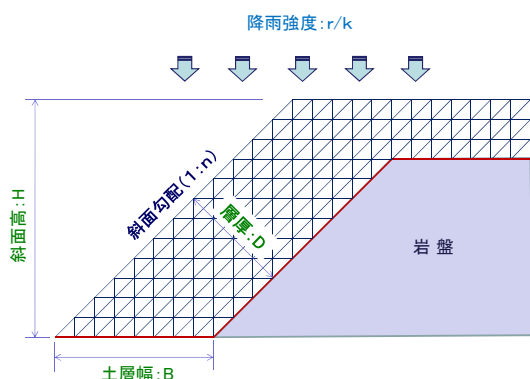


図-1 FEM 解析モデル

使用した解析手法は、FEM 飽和-不飽和浸透流解析⁶⁾であり、不飽和領域まで含めて、飽和度の変化に伴う透水性や圧力保持特性の変化を考慮して解析を進める。したがって、数値計算では、不飽和領域における透水特性を表す物性値の設定が必要であり、本研究では、先に行った水位急低下の浸透解析⁷⁾で使用した遠心模型実験の

堤体材料の物性値を参考に決定した。すなわち、水分保持曲線については、最小含水量 $\theta_r=0.025$ 、飽和体積含水率 $\theta_s=0.310$ 、限界毛管水頭 $\psi_{cr}=-0.6\text{m}$ (重力場での毛管上昇実験の計測値)とし、図-2 のような曲線形状を採用した。ただし、飽和透水係数は、区切りのよい数値として、 $k_s=3.0\times 10^{-3}\text{cm/s}$ を仮定した。

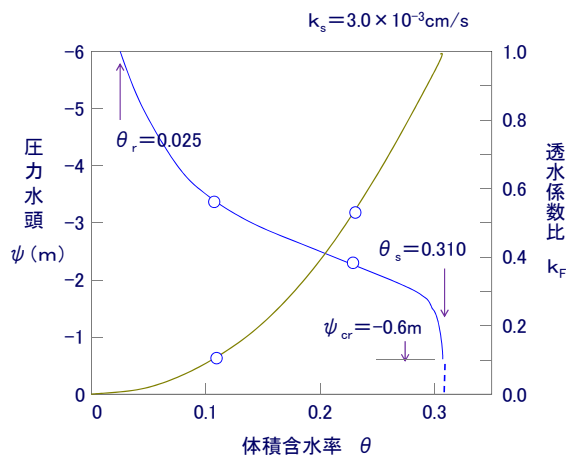


図-2 計算に使用した水分保持曲線

浸透特性以外の物性値についても、遠心模型実験に用いた堤体材料(細粒分混じり砂:SF)を参考に定めた。すなわち、自然斜面の表土層として、間隙比 $e=0.74$ 、初期飽和度 $S_r=50\%$ 、含水比 $w=13.9\%$ ($G_s=2.65$)の状態を考え、湿潤単位体積重量 $\gamma_t=17.0\text{kN/m}^3$ とした。また、三軸試験で $c=20\text{kPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ を得ているが、後の不安定化の考察(安全率の計算)では、 c 、 ϕ 値を幾つか変化させて、その影響を調べることにした。

2.2 計算内容

図-1 に示した一樣厚の表層斜面を対象とし、条件を幾つか変えて数値計算を行う。標準的には、高さ $H=10\text{m}$ 、勾配 $1:1.5$ 、土層幅 $B=4.5\text{m}$ (層厚 $D=2.50\text{m}$)の斜面を対象とし、これに降雨強度 20mm/hr の雨が継続して降る場合を主体に議論するが、これ以外に表-1 のように条件を設定して、各項目が浸透挙動や不安定化に及ぼす影響度合いを調べた。なお、降雨強度 $r=20\text{mm/hr}$ は、飽和透水係数 $k_s=3.0\times 10^{-3}\text{cm/s}$ ($=108\text{mm/hr}$)との比で表すと、 $r/k_s=0.185$ である。

表-1 計算条件

条件項目	数値変化
斜面勾配 (1 : n)	1:1.0, 1:1.5, 1:2.0
土層幅 B (m)	3.0, 4.5, 6.0 (n=1.5 時)
降雨強度 r (mm/hr)	10, 20, 30

3. 計算結果と考察

3.1 斜面内の降雨浸透挙動

図-3 は高さ 10m、土層幅 4.5m (層厚 2.5m)、勾配 1:1.5 の斜面に 20mm/hr の連続的な降雨が生じた時の、地下水面 (したがって飽和域) の形成状況を、降雨開始からの時刻歴 (時間 t) で示したものである。時間の経過とともに飽和域が順次拡大し、法先付近で雨水が貯留して水面が上昇するが、やがて排水と貯留が平衡して水位の上昇速度が鈍る傾向が見られる。

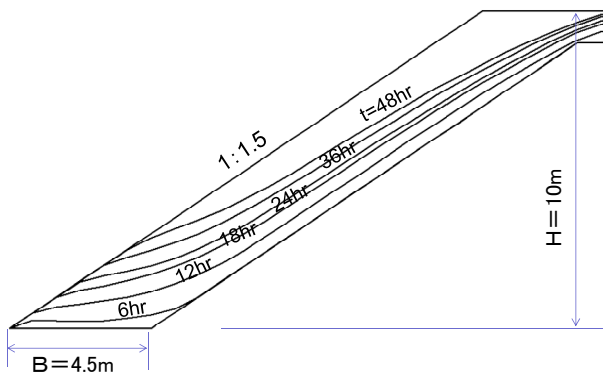


図-3 飽和域の形成 ($n=1.5$, $r=20\text{mm/hr}$)

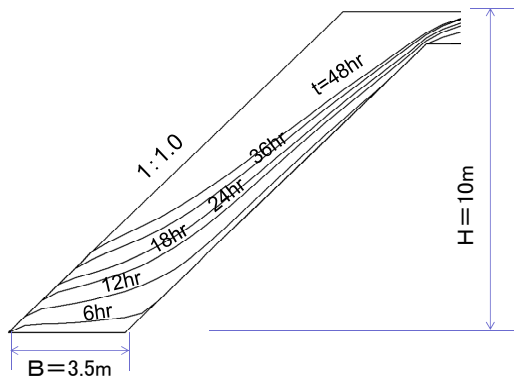


図-4 飽和域の形成 ($n=1.0$, $r=20\text{mm/hr}$)

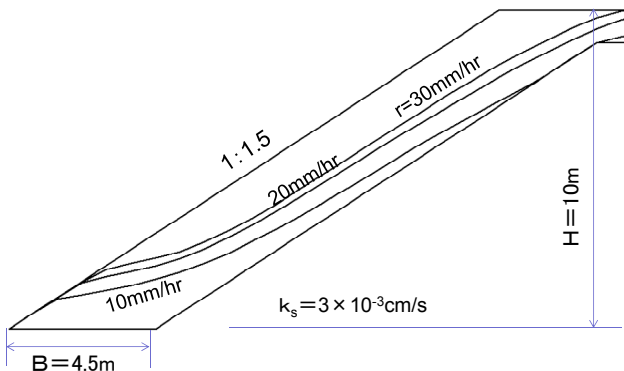


図-5 飽和域の形成 (降雨強度 r の影響)

図-4 は層厚 D を上と同じ約 2.5m とし、勾配を 1:1.0 と急傾斜にした場合である。飽和域の形成状況はほぼ同じ傾向を示しており、また法先付近での水面上昇の高さも勾配の影響をほとんど受けないことが分かる。

図-5 は、図-3 と同じ斜面 ($k_s=3 \times 10^{-3}\text{cm/s}$) に対し、降雨強度を $r=10, 20, 30\text{mm/hr}$ ($r/k_s=0.093, 0.185, 0.278$) に変化させた場合の $t=24\text{hr}$ における水面形を比較したものである。図示のように $r=10, 20\text{mm/hr}$ の差は明瞭であるが、 $r=20, 30\text{mm/hr}$ では水面形に大きな変化はなく、斜面内部への降雨の浸透が一定の透水性の下で限界に達し、残りは表面に沿って流下したことが想定される。なお、降雨強度・透水系数比: $r/k_s=0.185$ 一定の下で $r=10, 20, 30\text{mm/hr}$ に変えた計算 (対応して k_s 値を 1.5, 3.0, $4.5 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ に変化) も実施したが、どのケースも図-5 の水面形とほぼ一致する結果が得られた。すなわち、降雨浸透に支配的な影響を及ぼすのは降雨強度 r であり、透水系数の数倍の変化は現象にほとんど影響を与えないことが知れた。

図-6 は、図-3 の計算における $t=24\text{hr}$ 時の圧力水頭の分布を描いたものであり、形成された水面 ($h=0.0$) 上の不飽和領域まで含めて示している。水面形から類推されるように、等値線は傾斜区間ではほぼ斜面に沿って描かれるが、法先付近では浸透水が貯留し、かつ水平方向に排出される様相が伺われる。当然のことながら、間隙水圧の最大値は土層最下部の傾斜隅角部に現れる。

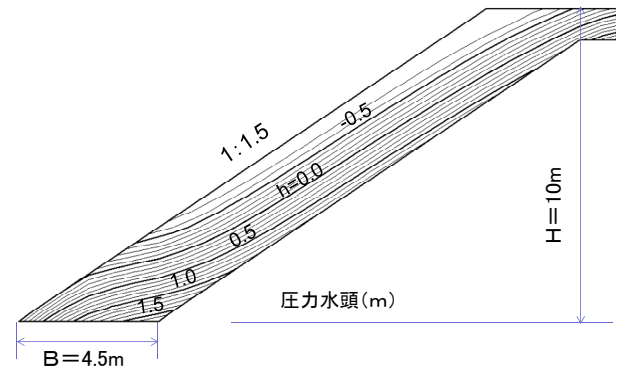


図-6 圧力水頭の分布 ($t=24\text{hr}$ 時)

図-7 は、上と同じ浸透状況において、土層内の各点における動水勾配の大きさと水流方向の分布を描いたものである。すなわち、各点において動水勾配の値に対応する長さ (動水勾配が 1.0 に相当する直線を図中に参照線として示した) の直線を水流方向に描いている。ここで、FEM 解から各点 (要素) の動水勾配の値と水流方向を求める方法は、以下のように別報⁷⁾で説明した。

図-8 において、三角形要素の 3 節点 i, j, k の全水頭値を (h_i, h_j, h_k)、その平均値を要素の代表値 h_e とする。

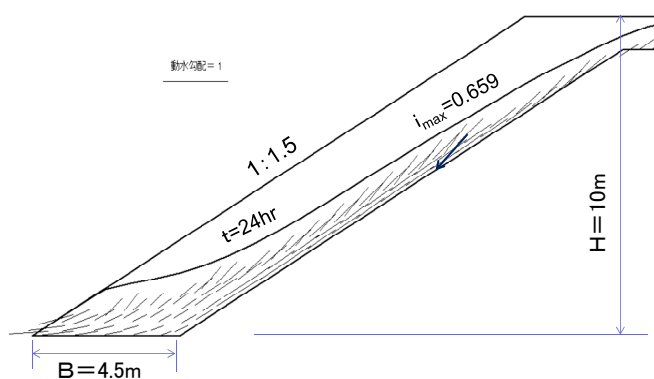


図-7 動水勾配と水流方向 (t = 24hr 時)

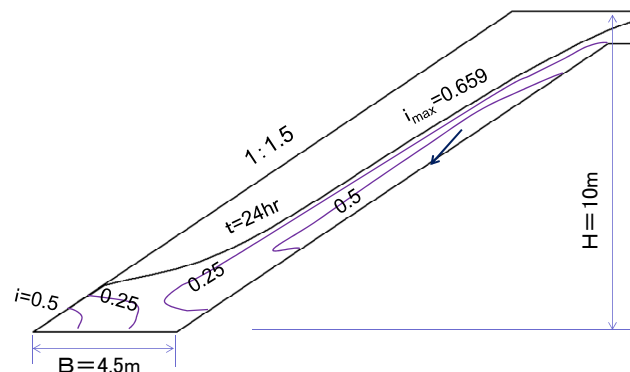


図-9 動水勾配の分布 (t = 24hr 時)

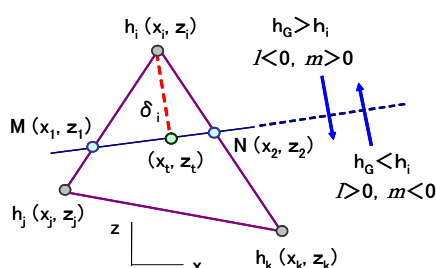


図-8 動水勾配と水流方向の算出

内挿によって h_g に等しい全水頭値を有する三角形辺上の 2 点 $M(x_1, z_1)$ 、 $N(x_2, z_2)$ を定めると、 MN 線は等水頭線になる。節点 i と MN 線間で $h_i - h_g$ が水頭差、点 i から MN 線に下した垂線 δ_i が浸透距離となるから、動水勾配 i とその方向余弦 (l, m) は次式で与えられる（ただし、 (l, m) の計算では水頭差 $(h_i - h_g)$ の符号を乗じる）。他の 2 節点 j, k でも同様な計算を行い、3 節点の平均値をもってその要素の代表値とする。

$$i(i) = \frac{|h_i - h_g|}{\delta_i} \left(l = \frac{x_t - x_i}{\delta_i}, m = \frac{z_t - z_i}{\delta_i} \right) \quad (1)$$

さて、図-7 を見ると、土層内では降雨に伴う浸潤の流れが生じ、これが土層底面に集積されて斜面に沿う浸透流となり、また法先付近では斜面外への排水の流れが生じていることが知れる。この流れにおいて、動水勾配の値が大きくなる領域は土層底面の斜面に沿う部分と、法先部であるが、最大値 (i_{\max}) を示す地点は斜面中腹部に現れており、図中に矢印で示している。

これらの様子をより詳細に見るために、図-9 に動水勾配の等値線を描いた。上述のように、土層底面の斜面に沿う部分と法先部に $i = 0.5 \sim 0.7$ の動水勾配の大きい領域が見られ、降雨により土層内に浸入した雨水が岩盤斜面に沿って下降し、水勢が一旦低下した後、法先にて土層外に流出する様子がうかがわれる。

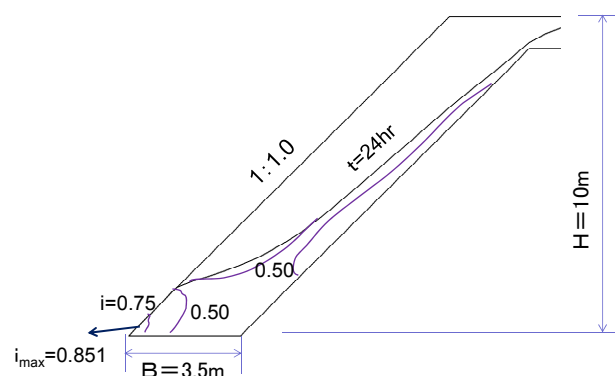


図-10 動水勾配 (1 : 1.0, t = 24hr 時)

図-10 は、比較のために勾配 1:1.0 の場合（層厚 D は前図と同じ約 2.5m）について動水勾配の分布を描いたものである。各部の水流の方向は図-7 とほぼ同様であるが、勾配が急な分だけ動水勾配の値が全般的に大きく、かつ法先に水流が集中する傾向が見られている。

以上の動水勾配や水流方向の議論は、降雨による斜面の不安定化の一つとして、法先の流線集中に伴う浸透破壊、すなわち土粒子の洗い出しやパイニング破壊に関連する問題であり、その安全性の評価方法については別の機会に論じたいと考えている。本論文では、もう一つの不安定化として、降雨により岩盤斜面に沿って生じられる間隙水圧が、表土層のすべり破壊に如何なる影響を及ぼすか、という問題に限定して以下に議論を進める。

3.2 降雨に伴う表土層のすべり破壊の評価

まず、降雨浸透により表土層の底面に生じられる間隙水圧の様相について調べる。図-11 は、勾配 1:1.5、降雨強度 20mm/hr の場合について、表土層が一定の厚さになっている部分の底面（岩盤斜面）を 7 区間に等分し、各区間の中間点における間隙水圧（圧力水頭で表示）の値を、降雨時間ごとに整理したものである。降雨開始当初は間隙水圧が斜面に沿ってほぼ一様に増加していくが、

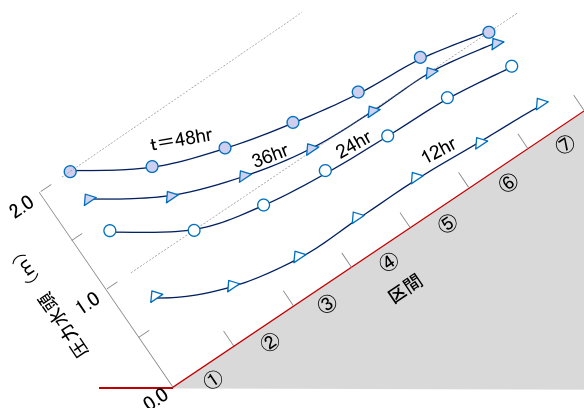


図-11 間隙水圧分布 (n=1.5, r=20mm/hr)

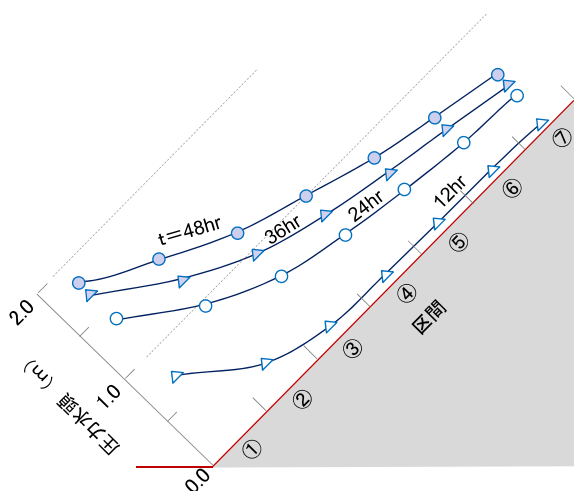


図-12 間隙水圧分布 (n=1.0, r=20mm/hr)

時間 t の経過に伴い斜面下部で飽和域が拡大する（浸潤面が高まる）ため、水圧値が大きくなる傾向が見られる。

図-12 は、同じ $r=20\text{mm/hr}$ で急傾斜（勾配 1:1.0）の場合である。水圧分布の形状は 1:1.5 の場合と類似しているが、勾配が急なため土層上部の水が速やかに下部に流下・貯留し、両部分の水圧値に大きな差が現れる様子が見られる。すなわち、土層上部では急傾斜で流れが速いため水面が低下し、水圧も減少するが、下部では流下した水が貯留するので、傾斜に関わらず水圧の大きさがほぼ同じ値を取ることが分かる。

さて、これら表土層底面に作用する間隙水圧が土層のすべり破壊に及ぼす影響を調べるために、まず単純な無限斜面として極限平衡解析を適用してみる。すなわち、上の間隙水圧分布を読み取った各区間に対応して、表土層を図-13 に示すように側面が鉛直の帯片に分割し、区間ごとにすべり安全率を求める。周知のように、単位体積重量 γ_t 、強度定数 (c, ϕ)、勾配角 α 、鉛直高 h の一様厚の均質土層において、各帯片の底面に作用する垂直・せん断応力 (σ, τ) とすべり安全率 F_{si} は、図中

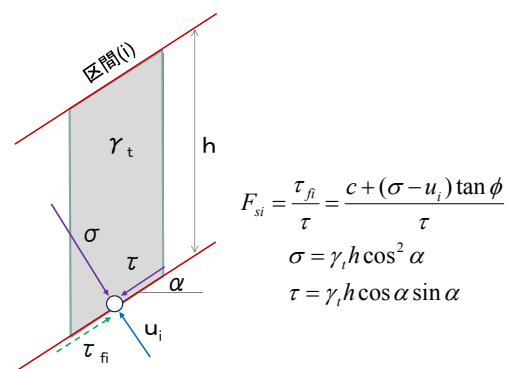
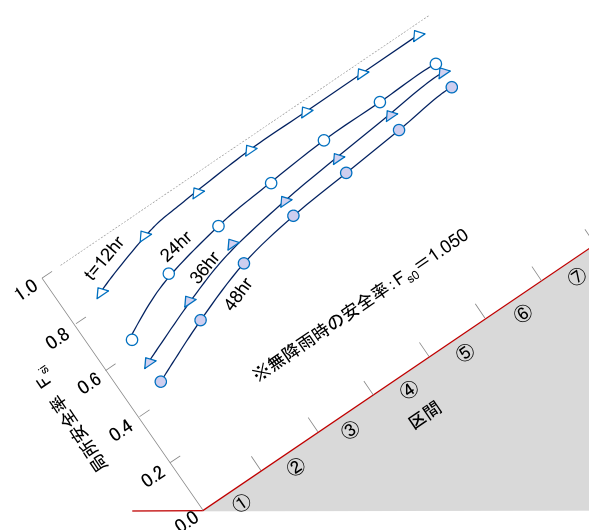


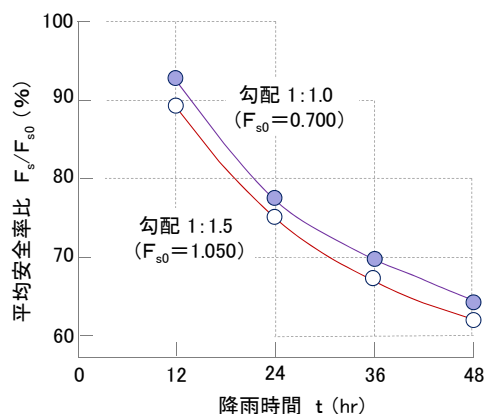
図-13 無限斜面の帯片

の式で算定される。一つの斜面では、高さ h と勾配角 α が一定であるから、(σ, τ) の値は場所によらず一定であり、各帯片のすべり安全率 F_{si} は図-11, 12 に示した間隙水圧 u_i の分布値に依存して変化する。以下の計算例では、土層の単位体積重量を $\gamma_t=17.0\text{kN/m}^3$ とし、強度定数 (c, ϕ) については組み合わせを幾つか変えて計算し、それらの影響を調べることにする。

まず図-14 は、図-11 の勾配 1:1.5 の間隙水圧に対応して、降雨開始からの経過時間 t ごとに斜面に沿って帯片安全率 F_{si} を計算した結果であり、議論を簡明にするために粘着力項を無視して ($c=0, \phi=35^\circ$) とし、摩擦効果のみを考えている。この場合、降雨がなく間隙水圧が発生していない状態 ($u_i=0$) では安全率 $F_{s0}=1.050$ であり、時間経過と間隙水圧の増加に伴って、特に土層下部で安全率が急激に低下する様子が見られる。

この帯片ごとの局所安全率 F_{si} を斜面に沿って平均化すれば、土層全体の一体的なすべり破壊に対する安全性が評価できる。そこで、図-11, 12 の両状態に対して、降雨時間 t ごとに平均安全率を計算し、安全性の変動傾向

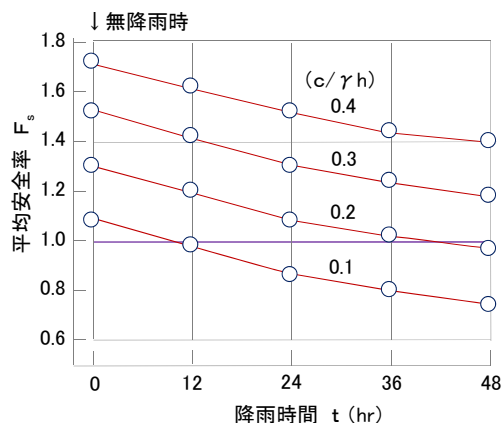
図-14 降雨に伴う不安定化 (n=1.5, $\phi=35^\circ$)

図-15 不安定化の進行 ($\phi = 35^\circ$)

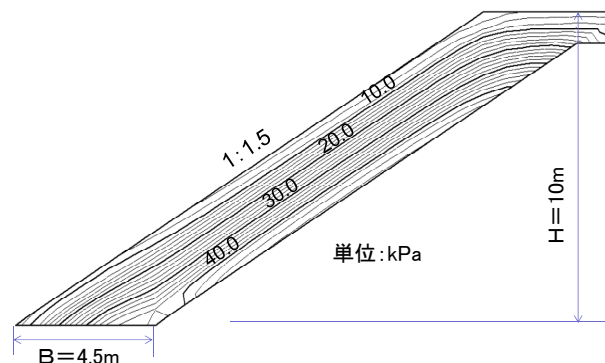
を調べたものが図-15 である。ここで縦軸の値は、各時刻の平均安全率 F_s を無降雨時の安全率 F_{s0} で除して正規化し、安全率比として表している。図を見ると、勾配に関係なく、降雨時間 t の経過に伴い安全率比が単調に低下する傾向が知れる。斜面の安全率は勾配が急なほど小さくなるが、間隙水圧分布と対照して考えると、急勾配ほど排水が速やかで各時刻の水圧値が相対的に小さくなるので、結果的に安全率比は緩勾配より若干大きく出るようである。ただし両者の差は小さく、降雨による安全率の低下傾向やその度合いは、斜面勾配に大きく依存しないことが分かる。

図-15 では、無降雨状態からの安全率の低下という形で、降雨に伴う表土層の不安定化の状況を見てきたが、次に粘着力の影響を考慮しながら、安全率の絶対値及びその変化傾向を調べてみる。図-16 は勾配 1:1.5 の斜面において表層土の摩擦角を $\phi = 30^\circ$ とし、粘着力 c を単位体積重量 γ_t と帯片高さ h の積で正規化した無次元の指標 $(c/\gamma h)$ で表し、 $c/\gamma h = 0.1 \sim 0.4$ の範囲で変化させた時の時間 t の経過に伴う平均安全率 F_s の動きを調べたものである。この例では、 $\gamma = 17.0 \text{ kN/m}^3$ 、 $h = 3.0 \text{ m}$ ($\gamma h = 51.0 \text{ kPa}$) であるから、数値的には $c \approx 5 \sim 20 \text{ kPa}$ の土を対象としている。また、 $t = 0$ の F_s 値は無降雨時 ($u = 0$) の平均安全率 F_{s0} を表す。図によると、 $F_s \sim t$ 関係は粘着力の大きさによらずほぼ同形であり、粘着力の等量の増加に伴って、安全率も各時刻において一定の増加を示すことが知れる。

同様の計算を勾配 1:1.0 の場合についても行ったが、緩勾配 1:1.5 と比べて安全率の値が全般的に小さくなることを除けば、時間の経過に伴う安全率の低下や粘着力の影響などの特性は基本的には変わらない。また、無降雨状態からの安全率の低下を見ても、図-15 と同様に急勾配の方が安全率比 (F_s/F_{s0}) の値が若干大きい、その差は全般的に 3% 程度で小さいことが知れた。

図-16 粘着力の影響 ($n = 1.5$)

以上は表土層を厚さ一定の無限斜面と仮定した場合であり、帯片底面に作用する (σ , τ) の値は図-13 中の式により、勾配 1:1.5 で $B = 4.5 \text{ m}$ の場合、 $\sigma = 35.3 \text{ kPa}$ 、 $\tau = 23.5 \text{ kPa}$ である。これら簡便な算定式による応力と、実際の応力状態との差及びその影響を調べるために、同形状の表土層を対象として FEM 自重応力解析を行った。図-17 は鉛直応力の等値線であり、斜面の上部と下部を除いた中間の区域では等値線が斜面に平行になり、ほぼ一様な応力状態が再現されることが分かる。

図-17 FEM 鉛直応力分布 ($n = 1.5$)

この FEM 解を用いて土層底面に作用する垂直・せん断応力 (σ , τ) を区間①～⑦で計算して分布を描き、それらの平均値と無限斜面解 ($\sigma_{\text{無限}}$, $\tau_{\text{無限}}$) を比較した結果が図-18 である。図によると、垂直応力 σ は斜面に沿ってほぼ一定の値を取り、平均値 $\sigma_{\text{FEM}} = 32.4 \text{ kPa}$ は $\sigma_{\text{無限}}$ より約 9% 小さい。一方、せん断応力 τ は斜面中部から上部で大きく、底部に向かって減少する傾向を示し、その平均値 $\tau_{\text{FEM}} = 18.6 \text{ kPa}$ は $\tau_{\text{無限}}$ より約 26% 小さくなる。

同様の計算を急勾配 1:1.0 の場合についても行い、両解による σ , τ の差、及びそれらが安全率に及ぼす影響を数値で比較整理した結果が表-2 である。ここで、安全率 F_s の値は、先に示した無降雨状態 ($u = 0$) で摩擦成

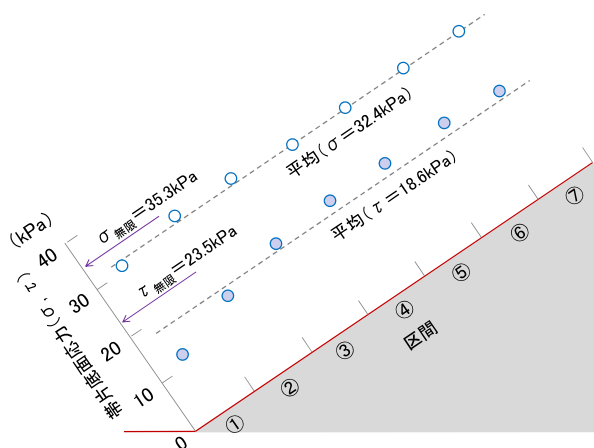
図-18 帯片底面の σ , τ ($n=1.5$)

表-2 応力算定の比較

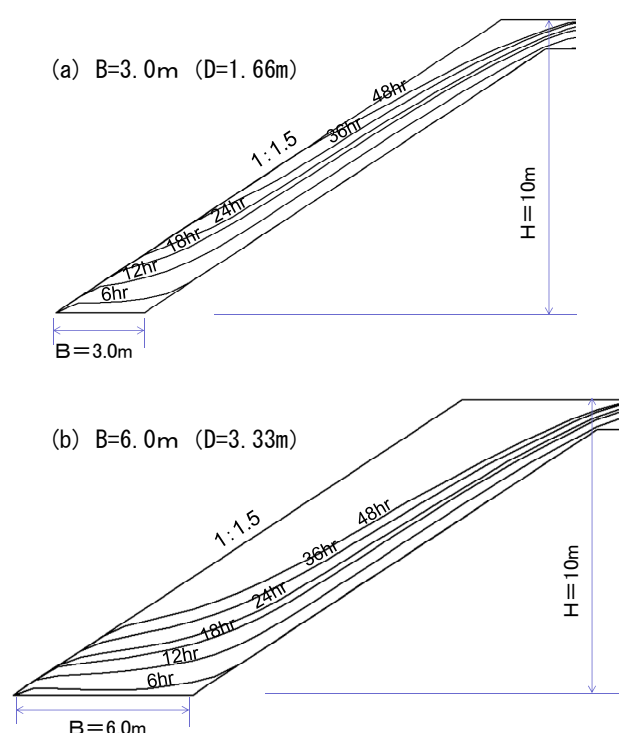
勾配	FEM 解			無限斜面解		
	σ_{FEM}	τ_{FEM}	F_s	$\sigma_{無限}$	$\tau_{無限}$	F_s
1:1.5	32.4	18.6	1.22	35.3	23.5	1.05
1:1.0	28.3	22.6	0.877	29.8	29.8	0.700

分のみ考慮した ($c=0$, $\phi=35^\circ$) の場合である。すなわち、安全率: $F_s = \sigma \tan \phi / \tau$ であり、両解の σ , τ 値の差が直接的に反映される量と考えてよい。表によると、FEM 解は無限斜面解より τ が σ に比べて相対的に小さく算定されるので、 F_s が大き目に評価される。また急勾配ほど σ の差が縮小し τ の差が拡大するので、 F_s の差が大きくなる。数値的に比較すると、FEM 解の F_s は無限斜面解より、緩勾配では約 14%、急勾配では約 20% の増加が示される。このように、本研究で対象とした一様厚の表土層では、安全率が低めに評価される無限斜面解を適用すれば、安全側の設計が確保される。

3.3 表土層のすべり破壊に関わる土層厚の影響

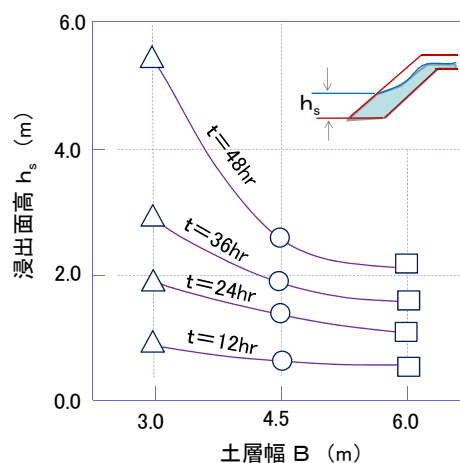
前節までの議論の中で、既に斜面勾配や降雨強度（透水係数との比）などの因子を幾つか変えて計算し、これらが降雨浸透の特性や斜面の不安定化に及ぼす影響について言及してきた。そこで、本節では主として表土層の厚さに着目して考察を進めることにする。ここで土層の厚さは底面幅 B で表現して表-1 のように変化させるが、対応する本来の土層厚 D (図-1) は、勾配 1:1.5 の場合、 $B=3.0\text{m}$, 4.5m , 6.0m に対し各々 $D=1.66\text{m}$, 2.50m , 3.33m である。

さて、図-19 は高さ 10m、勾配 1:1.5、土層幅 3m 及び 6m の斜面に 20mm/hr の降雨が生じた時の浸潤面形状（飽和域）の経時的変化を示したものであり、図-3 の $B=4.5\text{m}$ の場合に対比される。予想されることであるが、同

図-19 飽和域の形成 ($r=20\text{mm/hr}$)

じ時刻でも、土層厚が薄いと浸潤面が高まり、斜面内の飽和域の範囲が拡大する。

図-20 は降雨による浸透水が斜面表面に現れる浸出面の高さ h_s と土層幅 B の関係を時刻ごとに調べたものである。降雨時間 t の経過に伴い、また土層幅が狭くなるに従い浸潤面が高まり、連動して浸出面 h_s が高まるが、その変化は $B=3.0\text{m}$ でより顕著に現れる傾向が見られる。逆に言えば、土層幅が 4.5m を超える範囲では、同時刻において、浸出面高 h_s が B 値によらず一定値に収束する様子がうかがわれる。

図-20 浸出面高への影響 ($r=20\text{mm/hr}$)

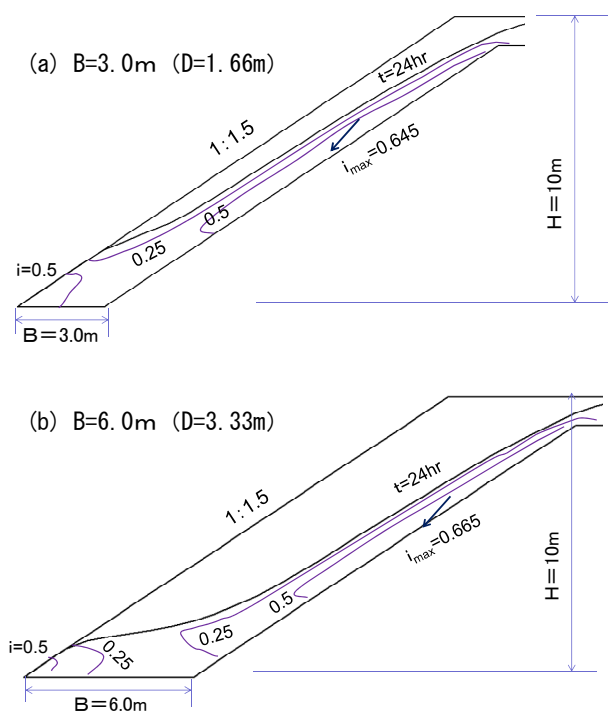
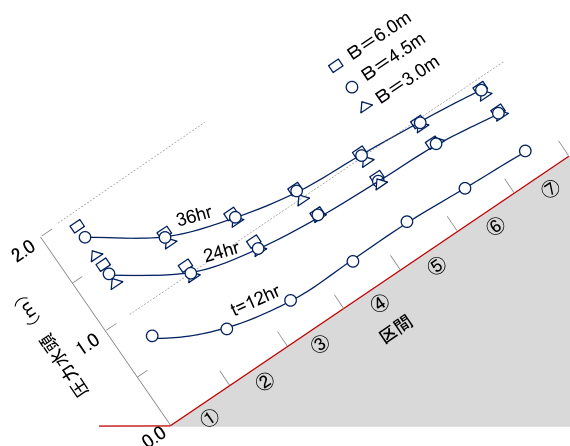
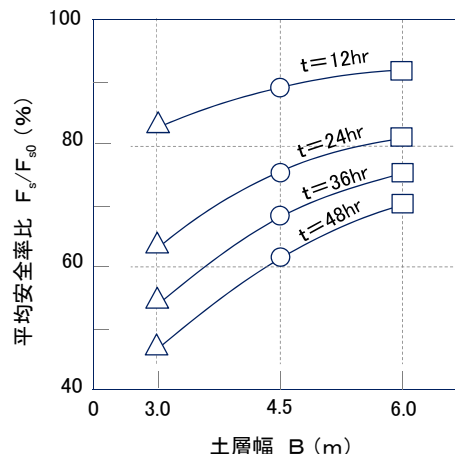
図-21 動水勾配の分布 ($r = 20\text{mm/hr}$)

図-21 は、図-9 の $B = 4.5\text{m}$ と対応して、 $B = 3.0\text{m}$ 、 6.0m の場合の動水勾配の等値線 ($t = 24\text{hr}$ 時) を描いたものである。3つの図を比較すると、数値的にも、分布形状としても、流れの様子にはほとんど変化が見られない。すなわち、傾斜面に沿う降雨浸透の様相は土層厚にほとんど影響を受けず、土層幅 B の大小は、法先への排水状況 (図-20 の浸出面高 h_s や水流の集中度合) の変化に若干関わる程度である。因みに、図-22 は土層底面に沿う圧力水頭の分布を描き、土層幅 B の影響を調べたものである。土層下部の区間①～③を除くと、 B の変化による水圧変動は極めて小さいことが知れる。

図-22 間隙水圧分布 ($r = 20\text{mm/hr}$)図-23 土層厚とすべり安全率 ($n = 1.5$)

以上のように、表土層底面に沿う間隙水圧は土層幅の影響をほとんど受けないので、前節で検討した一様土層のすべり破壊において、土層幅 B はすべり土塊の帯片高さ h 、すなわち (σ , τ) の値 (図-13) に主として関連する。したがって、土層幅が狭いほど拘束圧 σ が小さくなるので、間隙水圧が同程度であれば連動して安定性が低下する状況が生まれる。図-23 は先と同様に摩擦効果のみ考え ($c = 0$, $\phi = 35^\circ$)、降雨時間 t ごとに土層幅 B の変化に伴う安全率の動向を調べたものである。ただし、縦軸の値は安全率ではなく、水圧発生がない無降雨状態からの安全性の低下度合として、図-15 と同様に F_{s0} 値 (勾配 1:1.5 の場合 $F_{s0} = 1.050$) で正規化し、安全率比で表している。図に見られるように、どの降雨時間 t でも土層幅が狭くなると安全率が低下する傾向にあるが、時間が経過し間隙水圧が高くなると、その低下度合が急激になる様子がうかがわれる。

以上のような表土層の傾斜底面 (岩盤面) に沿うすべり破壊とは別に、図-24 に図示したように、土層先端の三角形の土塊が浸透力や土圧・水圧の作用によりすべり出す破壊形態も考えられるので、最後に若干言及しておきたい。図において、先端の三角形土塊に作用する力

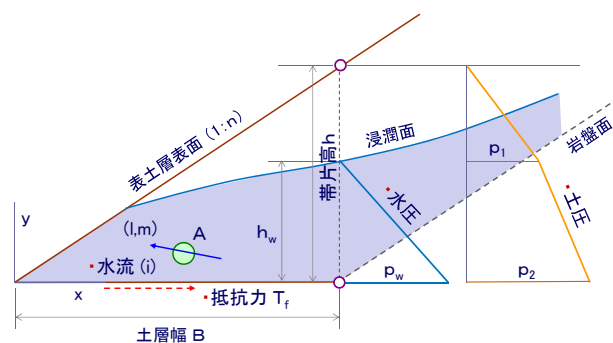


図-24 三角形土塊のすべり出し

を列挙すると以下のようになる。

- ①土塊の有効重量 W ：浸潤面の上で γ_t 、下で γ'
- ②浸透力：浸潤面下の要素(面積 A)に式(1)を適用

$$F_x = \Sigma (1 \times i \gamma_w A), F_y = \Sigma (m \times i \gamma_w A)$$
- ③土塊側面に作用する水圧： $P_w = \gamma_w h_w^2 / 2$
- ④土塊側面に作用する純土圧： P_a (主働土圧)

$$P_h = P_a \cos \delta, P_v = P_a \sin \delta \quad (\delta = \phi)$$

これらの内、土塊のすべり出しに関わる滑動力 F_d は浸透力の水平成分 F_x と水圧 P_w 、水平土圧 P_h であり、底面に作用する拘束力は有効重量 W と浸透力・土圧の鉛直成分 F_y, P_v の和である。したがって、底面の粘着・摩擦抵抗成分を土層の (c, ϕ) と同じとして、すべり出しに関する安全率 F_s は下式で算定される。ただし、浸透力の成分 (F_x, F_y) は x, y 座標の方向を正としているので、滑動力及び拘束力の表現においては負符号が付く。

$$F_s = \frac{T_f}{F_d} = \frac{c \cdot B + (W - F_y + P_v) \tan \phi}{-F_x + P_w + P_h} \quad (2)$$

図-25 は、図-7 と同じ水流状況 (勾配 1:1.5、土層幅 $B=4.5\text{m}$ 、 $r=20\text{mm/hr}$ 、 $t=24\text{hr}$) の法先部を拡大して示したものである。前述のように、飽和域内に描いた直線は、その長さが動水勾配 (i) の大きさ、その方向が水流方向 (l, m) を表している。一例として、この法先の三角形部 abc に作用する諸力を数値で列挙すると

土塊の有効重量： $W=59.6\text{kN/m}$ (浸出高 $h_s=1.4\text{m}$)

浸透力： $F_x=-14.2\text{kN/m}$, $F_y=-5.65\text{kN/m}$

bc 面の水圧： $P_w=19.32\text{kN/m}$ (浸潤面 $h_w=1.99\text{m}$)

bc 面の土圧： $P_h=12.69\text{kN/m}$, $P_v=8.89\text{kN/m}$

となり、摩擦効果のみ考えた ($c=0$, $\phi=35^\circ$) 計算では、安全率として $F_s=1.123$ が得られる。

このような計算を、土層幅 B を変え、降雨時間 t ごとに計算して安全率 F_s の変動状況を整理すると、図-26 を得る。先に述べたように、斜面に沿って発生する間隙水圧は土層幅 B の影響を殆ど受けないので、同一時刻で比較すると、土層幅が広がるほど有効重量 W が増して摩擦抵抗 T_f が大きくなり、また側面 bc に働く水圧 P_w の滑

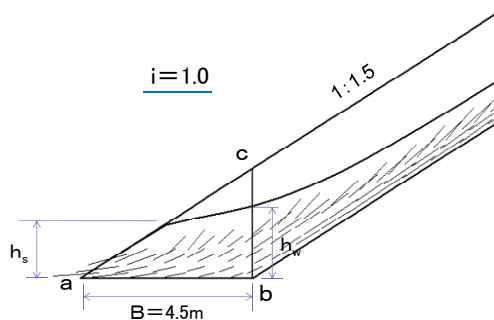


図-25 すべり出し計算例

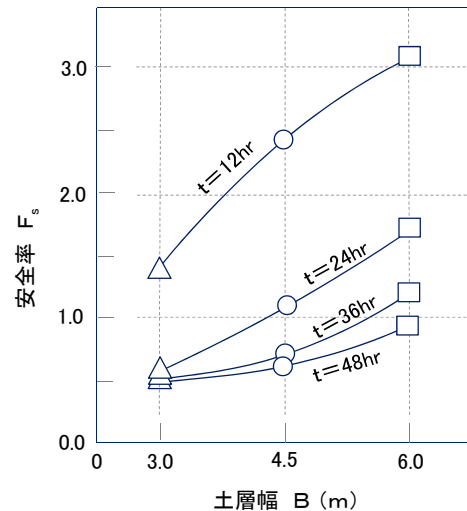


図-26 すべり出し安全率

動力としての影響が相対的に低下するので、安全性が向上する傾向が見られる。しかし、降雨時間がかなり経過すると、飽和域の広がり (浸潤面高 h_w の上昇) に伴って側面水圧 P_w の影響が大きくなり、土層幅に関わらず安全性が急激に低下することが知れる。

最後に、図-13 の形で計算した岩盤面に沿う一様厚土層のすべり破壊の安全率を F_{s1} 、図-24 で計算した法先の三角形部のすべり出し破壊の安全率を F_{s2} とし、これらの比率 (F_{s2}/F_{s1}) を調べて、降雨浸透に伴う斜面の不安定化を評価・議論する際の検討地点や破壊形態の考え方について若干考察を加えたい。図-27 は、この趣旨で、安全率比と土層幅 B の関係を降雨時間 t ごとに描いたものである。数値的にも、変化傾向にしても、図-26 の関係と類似した結果が得られており、総じて三角形部のすべり出し破壊 (F_{s2}) の特徴が反映しているようである。すなわち、先に述べたように、降雨により土層底面 (岩

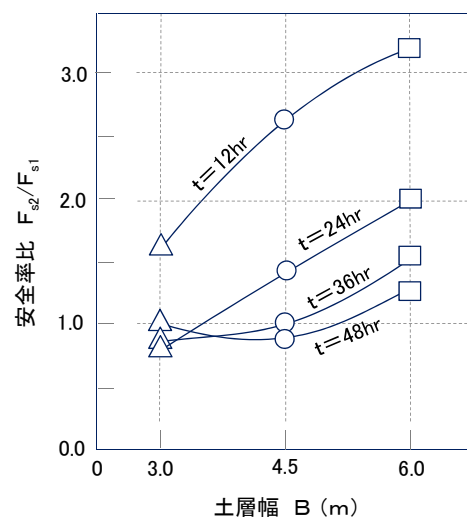


図-27 破壊形態による安全性の相違

盤面) に沿って発生する間隙水圧は土層幅 B の影響をあまり受けないので、すべり安全率 (F_{s1}) も土層幅の変化に対し相対的に変動が小さく、法先部のすべり出し安全率 (F_{s2}) の特徴がより強調されるのである。後者の安全率の変動が大きいのは、時間の経過に伴う法先部の飽和化や水位上昇が、土塊重量 W を軽減し、かつ側面に働く滑動水圧 P_w を増大させる効果の現れであると考えられる。いずれにしても、降雨時間 t が小さい範囲では法先のすべり出しより、一様土層のすべり破壊が卓越する傾向にあるが、時間の経過とともに（特に土層幅が狭い場合は）安全率比が 1.0 に近くなり、両破壊形態の均等な出現が想定される。

4. 結論

本研究で得られた成果と知見を整理すると、以下のようにならめられる。

- (1) 厚さ一定の表土層斜面が降雨を受ける時の浸透挙動の特性を、関連するパラメータを幾つか変えて調べた。この結果、①降雨により土層内に浸入した雨水は岩盤斜面に沿って下降し、水勢が一旦低下した後、法先にて土層外に流出する様相を示すこと、②斜面内では時間の経過とともに飽和域が順次拡大し、やがて排水と貯留が平衡して水位の上昇速度が鈍ること、③この飽和域の形成や法先付近の水面上昇に対し、勾配の緩急の影響は小さいこと、④降雨浸透に支配的な影響を及ぼす因子は降雨強度であり、土層の透水係数の数倍の変化は現象に殆ど影響を与えないこと、などが知れた。
- (2) 降雨に伴う表土層のすべり破壊について明らかにされた事項は、①表土層の底面に生じられる間隙水圧は、降雨開始当初は斜面に沿いはば一定であるが、時間経過に伴い斜面下部では飽和域が拡大するため水圧値が高まること、②斜面に沿うすべり安全率は時間経過に伴って単調に減少するが、無降雨時の安全率からの低下度合でみると、その変化は斜面勾配の緩急に関わらずほぼ一定の傾向を示すこと、③無限斜面解による安全率と FEM で求めた応力解に基づく安全率を比較すると、前者が 15%~20% 小さく算定され、無限斜面解を適用すれば安全側の設計が確保されること、などである。
- (3) 表土層のすべり破壊に対する土層厚の影響を調べた結果では、①表土層底面に沿う浸透の様相は土層厚の影響をほとんど受けず、法先の浸出面高や水流の集中度合に若干変化が現れる程度であること、②土

層幅が薄いとすべり安全率が低下する傾向にあるが、時間が経過し間隙水圧が高くなると、その低下度合が急激になること、③法先の三角形部のすべり出し破壊も、土層厚が薄いほど先端の浸潤・水圧の影響を大きく受けて安全性が低下すること、④降雨開始当初は法先のすべり出し破壊より一様土層のすべり破壊が卓越するが、時間の経過とともに両破壊形態の均等な出現が想定されること、などが知れた。

本論文では、降雨による表土層の物性変化や降雨時の初期状態などの影響については言及できなかった。また間隙水圧（有効応力低下）や滑動水圧の作用に起因するすべり破壊だけに議論を限定し、法先の水流通集中に伴う浸透破壊に関しても検討を省いた。これらについては、次年次に更なる研究を進め、続報として補足に努めたいと考えている。

謝辞

本報告は、科学研究費補助金 (No. 23560599, 研究代表者：奥村哲夫) の助成を受けた研究をまとめたものであり、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 秦吉弥, 一井康二: 降雨の影響を考慮した盛土の材料物性の評価と耐震性評価, 地盤工学会誌, 58-2, pp. 26-29, 2010.
- 2) 笹原克夫, 山口純平, 酒井直樹, 植竹政輝: 降雨浸透に伴う砂質斜面の吸水・排水過程における圧縮・せん断変形, 地盤工学ジャーナル, 6-1, pp. 129-140, 2011.
- 3) 金子広明, 田中洋行, 工藤豊, 久保田勇貴: 遠心模型実験装置を用いた降雨時における砂層地盤の斜面安定, 第 44 回地盤工学会研究発表会, pp. 1687-1688, 2009.
- 4) 泉奈王子, 関栄, 井澤淳, 高橋章浩: 降雨による斜面変形に対するクラックの影響, 第 45 回地盤工学会研究発表会, pp. 1731-1732, 2010.
- 5) 岩船太郎, 加藤徹, 向後雄二, 外狩麻子, 島村誠: 緩く堆積した砂斜面の降雨による崩壊遠心模型実験と解析, 第 45 回地盤工学会研究発表会, pp. 1733-1734, 2010.
- 6) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp. 87-96, 1977.
- 7) 成田国朝, 木村勝行, 奥村哲夫: 水位低下に伴う浸透挙動と斜面の安定性評価について, ダム工学, Vol. 18, No. 1 (69 号), pp. 10-20, 2008.

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)